

刘增伟, 陶秋香, 王 峰, 等. 基于升降轨 D-InSAR 获取台湾美浓  $M_w$  6.7 地震同震形变场 [J]. 华南地震, 2020, 40 (3): 63-69. [LIU Zengwei, TAO Qiuxiang, WANG Feng, et al. The Coseismic Deformation Field Obtaining of Meinong  $M_w$  6.7 Earthquake in Taiwan based on D-InSAR [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (3): 63-69]

# 基于升降轨 D-InSAR 获取台湾美浓 $M_w$ 6.7 地震同震形变场

刘增伟, 陶秋香, 王 峰, 李兴远

(山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要**: D-InSAR 技术能够在大范围内获取地表形变信息, 但由于卫星侧视几何成像模式、研究区地形地貌等的影响, 升降轨 D-InSAR 技术获取的地表形变存在差异。利用双轨 D-InSAR 技术对 6 景升降轨 Sentinel-1A 数据分别进行差分干涉处理, 得到升降轨不同视线向上台湾美浓  $M_w$  6.7 地震区地表形变图, 直观地再现了震区在 2016 年 2 月 6 日地震前后的地表变化。研究结果表明升轨 D-InSAR 监测到台湾地震造成的地表抬升最大达 16 cm, 降轨 D-InSAR 监测到地表下沉最大达 -11 cm, 联合升降轨数据, 可获得较为真实的研究区地表形变。

**关键字**: 合成孔径雷达差分干涉测量; 地震; 地表形变; 升降轨; Sentinel-1A

**中图分类号**: P237 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-8662 (2020) 03-0063-07

**DOI**: 10.13512/j.hndz.2020.03.09

## The Coseismic Deformation Field Obtaining of Meinong $M_w$ 6.7 Earthquake in Taiwan based on D-InSAR

LIU Zengwei, TAO Qiuxiang, WANG Feng, LI Xingyuan

(Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract**: The D-InSAR technology can get the surface deformation information in a wide range, but due to the influence of satellite side-view geometric imaging mode and the topography of the study area, there are many differences in surface deformation obtained by D-InSAR technology. This paper performed differential interference processing on the six-scenes Sentinel-1A data by using the dual-track D-InSAR technology, and obtained the surface deformation maps of the Meinong  $M_w$  6.7 earthquake area with different sight lines, which visually reproduced the surface changes in the earthquake area before and after the earthquake on February

**收稿日期**: 2019-11-07

**基金项目**: 国家自然科学基金 (41404003); 国家自然科学基金 (41774002); 山东省自然科学基金 (ZR2017MD020)  
联合资助

**作者简介**: 刘增伟 (1999-), 男, 本科在读, 现主要从事 InSAR 数据处理与分析研究。

**E-mail**: 1976989090@qq.com

**通信作者**: 陶秋香 (1977-), 女, 博士、副教授, 主要从事 InSAR 理论及其关键技术研究。

**E-mail**: qiuxiangtao@163.com

6<sup>th</sup>, 2016. The results show that the maximum surface uplift caused by the Taiwan earthquake monitored by the ascending orbit D-InSAR technology is up to 16 cm, and the maximum ground subsidence detected by the descending D-InSAR is -11cm. Combining the ascending and descending orbit data, a more realistic surface deformation of the study area can be obtained.

**Keywords:** Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar; Earthquake; Earth surface deformation; Ascending and descending orbit; Sentinel-1A

## 0 引言

2016 年 2 月 6 日凌晨 3 时 57 分 26 秒, 据中国地震台网测定, 台湾省高雄市发生里氏 6.7 级地震, 震中位于高雄市美浓区 (22.94°N, 120.54°E), 震源深度 15 km, 高雄、台东、台南、嘉义地区受本次地震影响最大, 台南市是此次地震的重灾区。截至 2016 年 2 月 18 日晚, 地震共造成 117 人罹难。

通过研究发震区域的地震同震形变场, 对于揭示发震断层的运动学和几何学性质, 确定地震震中的地理位置, 解析发震区域的地表变形强度和变形机制有着重要意义<sup>[1]</sup>。因为 SAR 影像独特的成像特点和方式, 决定着 D-InSAR 技术具有着可达厘米级的观测精度, 能够实现大范围区域的全天候监测, 能够较为灵敏的监测大范围区域内的微小变形。近年来 D-InSAR 技术持续发展, 已成为空间对地观测最重要的手段和最活跃的领域之一, 在矿区及城市地表沉陷监测、地震形变场反演以及冰川移动监测等领域发挥了重要的作用<sup>[2]</sup>。1989 年, Gabriel 等人<sup>[3]</sup>首次提出合成孔径雷达差分干涉的概念, 并证实了 D-InSAR 技术的可行性。1993 年, Massonne 等人<sup>[4]</sup>使用加利福尼亚地震前后影像进行差分干涉处理, 获得了震区的地震同震形变场。本文利用升降轨 D-InSAR 技术对升降轨 Sentinel-1A 数据进行差分干涉处理, 获取到台湾美浓  $M_w$  6.7 地震同震形变场, 来较为全面、真实的展现震区在地震前后的地表变化。

董景龙<sup>[5]</sup>等主要利用 1 对升轨影像数据获取了台湾美浓的形变场, 杨亚夫<sup>[6]</sup>等主要利用了 1 对升轨数据和 1 对降轨数据获取了台湾美浓的地震三维形变场, 本文同时使用 Sentinel-1A 卫星获取的升轨和降轨数据, 并且采用两景不同日期但时间相仿的震前数据与同一景震后数据做差分干涉处理, 基于更加丰富的数据,

共采用台湾地震前后 6 景 (4 对) 升降轨 SAR 影像数据, 并利用双轨 D-InSAR 技术进行差分干涉处理, 共获得 4 幅升降轨雷达视线方向上的地表形变图, 以此获取较为真实的震区地表形变特征, 有助于为理解地震形变过程、发生机理等提供资料。

## 1 Sentinel-1A 数据及研究区简介

### 1.1 Sentinel-1A 卫星工作模式

Sentinel-1 卫星是由 Sentinel-1A 和 Sentinel-1B 两颗位于同一轨道平面卫星组成的双星座卫星, 两颗卫星在轨道平面内的相位差 180°<sup>[7]</sup>。其中 Sentinel-1A 在地震形变监测和灾害应急响应中具有重要作用。

Sentinel-1A 的所有数据由欧空局免费向所有用户开放, 该卫星的 Level-1 级数据产品包括 SLC (Single Look Complex) 和 GRDH (Ground Range Detected) 数据, 因其具有地理参照系数、时间参考、辐射系数等而适用于绝大多数用户。Sentinel-1A 卫星的 C 波段成像系统具有四种成像模式: 宽幅模式、波模式、条带模式和超宽幅模式, 其中干涉宽幅模式的影像可按沿轨干涉获取方位向形变<sup>[6]</sup>。

### 1.2 Sentinel-1A 卫星升降轨数据

Sentinel-1A 为近极地太阳同步轨道卫星, 轨道倾角为 98.18°, 轨道平面近似南北向。在卫星运动过程中, 卫星轨道平面与地球赤道面有两个交点, 分别称为升交点和降交点 (图 1)。由于地球的自转运动和卫星绕地运动, 使得在卫星成像范围内, 地面上任意区域都会存在卫星两种相向的飞行轨迹, 由此形成了卫星的两种成像数据: 降轨数据和升轨数据。升轨数据即卫星在由南向北飞行时对地观测所形成的影像, 反之成像结果为降轨数据。

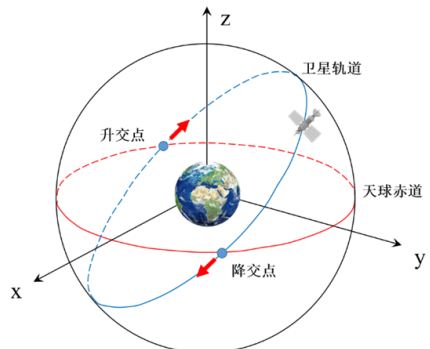


图 1 卫星运行轨道  
Fig.1 Satellite orbit

本文选取了如表 1 所示的台湾地震前后的 6 景 SAR 影像，包括 3 景降轨数据和 3 景升轨数据，每景 SAR 影像数据均覆盖以震中（22.94°N, 120.54°E）为圆心的 20 km 半径内区域，1 景震前数据和 1 景震后数据组成 1 个干涉对，共得到 4 个干涉对，用于研究升降轨 D-InSAR 的差异及其对结果的影响，获取台湾地震地表形变分布。其中，T069 为升轨数据，T105 为降轨数据（如图 2(a) 所示）。

表 1 实验采用的 Sentinel -1A 数据信息表  
Table 1 Sentinel -1A data information table used in the experiment

Track	干涉对	时间基线 /d	空间基线 /m
T069	2016-01-09~2016-02-14	36	-64.213
T069	2016-02-02~2016-02-14	12	-26.370
T105	2016-01-11~2016-02-28	48	-40.280
T105	2016-02-04~2016-02-28	24	-28.623

1.3 研究区域地质概况

台湾省位于中国大陆架的东南延伸处，处在菲律宾海板块与欧亚板块之间的挤压地带，由长久的造山运动挤出海面所形成。在台湾南部，欧亚板块正向菲律宾海板块不断靠近，两个板块约以每年 80 mm 的速度相互聚合，板块与板块之间的挤压作用使得台湾地区地形南北狭长，并且在岛内的中央山脉、东部的海岸山脉、西部的麓山带以及西部海岸平原区域形成了大量的呈现南北方向的褶皱断层，这些断层大都具有很高的活动性，因此造成了台湾地区地震多

发的历史事实<sup>[5]</sup>。  
根据台湾地区的特殊地质构造情况，科学界目前把台湾划分为三个不同的地震构造带，分别是西部、东部及东北部地震构造带。有专家指出，本次高雄地震发生在台西部地震构造带，震中位于左镇断层、旗山断层之间的地震密集区（图 2(b)），地震密集带和人口密集带叠加，加剧了人员和经济损失<sup>[8]</sup>。而旗山断层恰好位于台湾西部地震构造带，其构造类型属于活动断层，此次高雄地震由旗山断层的错动所引发<sup>[9]</sup>。

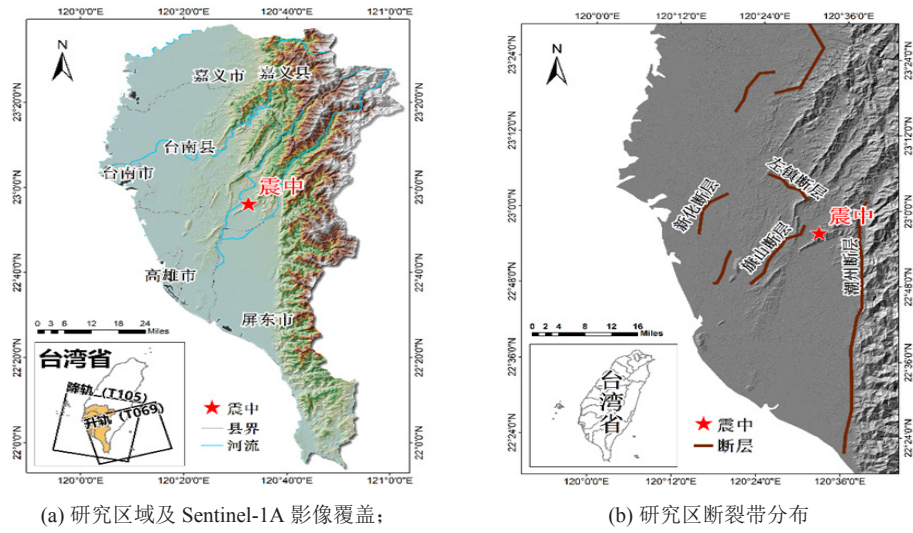


图 2 研究区域范围及地质概况  
Fig.2 Study area and general geology

## 2 台湾地震升降轨 D-InSAR 干涉处理及形变分析

### 2.1 主要处理过程及结果

InSAR 利用雷达回波信号的相位信息来获取地表的高程信息<sup>[10]</sup>。InSAR 的工作方式主要有三种：交轨干涉测量 (Cross-Track Interferometry, XTI)、顺轨干涉测量 (Along-Track Interferometry, ATI)、重复轨道干涉测量 (Repeat-

Track Interferometry, RTI)<sup>[11]</sup>。重复轨道干涉测量又称为双轨干涉测量，即同一颗卫星在不同时刻，两次经过几乎相同的轨道时对地表目标成像，获得两幅具有一定相干性的影像，进行差分处理，即影像对应像素复数值共轭相乘，得到干涉图。在实际处理中，通常结合已知的 DEM 数据，消除干涉图中地形起伏因素对相位的影响，从而检测出地表的微小形变。利用双轨 D-InSAR 进行差分干涉测量处理获取地表形变的流程如下图 3 所示：

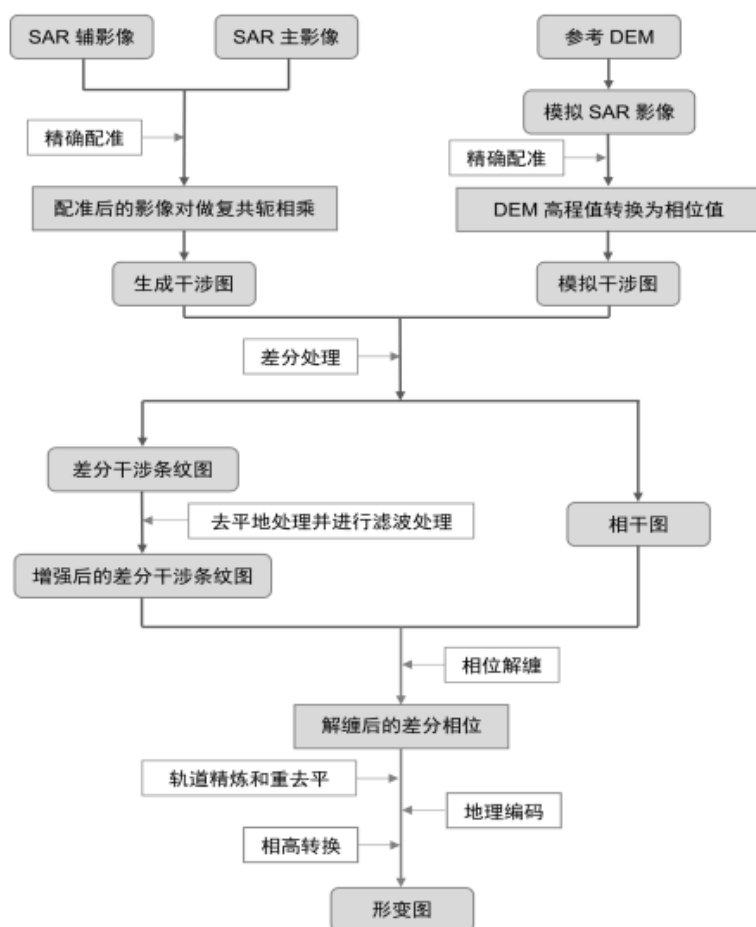


图 3 双轨 D-InSAR 差分干涉处理流程图

Fig.3 Flow chart of dual-track D-InSAR differential interference processing

按照图 3 所示流程，对 4 个干涉对分别进行升降轨 D-InSAR 处理，主要包括差分干涉图生成、差分干涉图滤波、相位解缠、轨道精炼和重去平、相高转换等。

#### (1) SAR 影像裁剪

实验所用的 Sentinel-1A 数据是在干涉宽幅成像模式下得到的，数据幅宽 250 km，一景数据覆盖范围很大，为避免失相干区域以及噪声较多的非形变区对处理带来较大误差，需要对

影像数据进行裁剪，保留震中附近区域，便于处理，并得到较好的效果。

#### (2) 干涉图生成

将各干涉对主、辅两景影像的同名像素做复共轭相乘，并利用外部 DEM 数据去除地形相位的影响，得到如图 4 所示的差分干涉图。从初始干涉图中均可以看出地表有一定的形变发生，升轨数据中干涉纹图更清晰，降轨数据噪声较多且形变不明显。



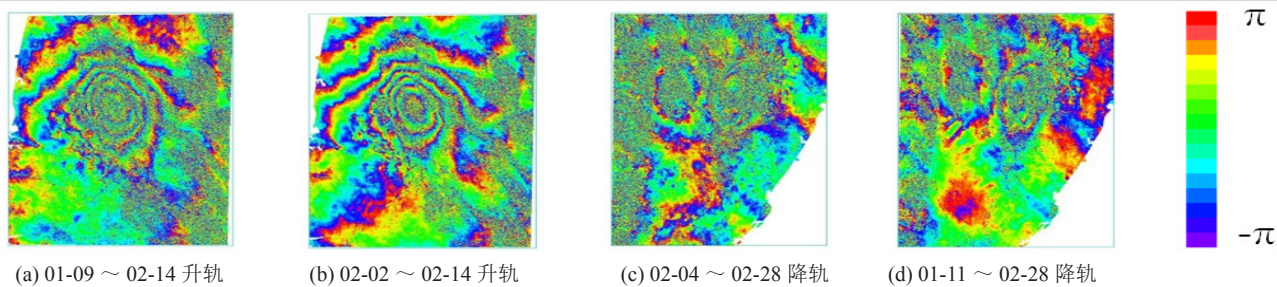


图4 差分干涉图

Fig.4 Differential interferogram

### (3) 干涉图滤波

初始干涉图包含有较多的由大气延迟、轨道误差等产生的噪声，因此要对干涉图进行滤波处理，实验采用 Goilden 滤波方法进行 2 次滤波处理，在最大限度保留有用信息情况下滤除

噪声。

对滤波后的干涉图进行地理编码，得到地理坐标系下的滤波后差分干涉图 5。从图中可以看出，升降轨数据均能反应出地表形变，在降轨数据中，雷达视线向有两个相邻的形变区。

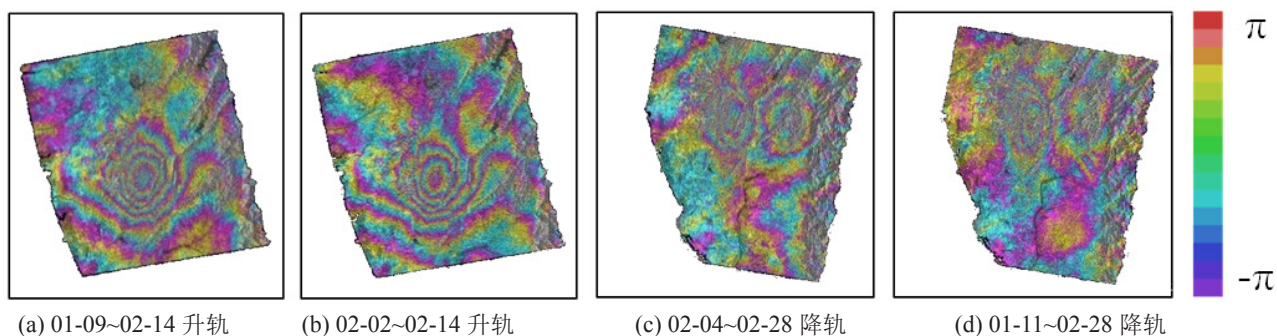


图5 滤波后差分干涉图（经地理编码后）

Fig.5 Differential interferogram after filtering (after geocoding)

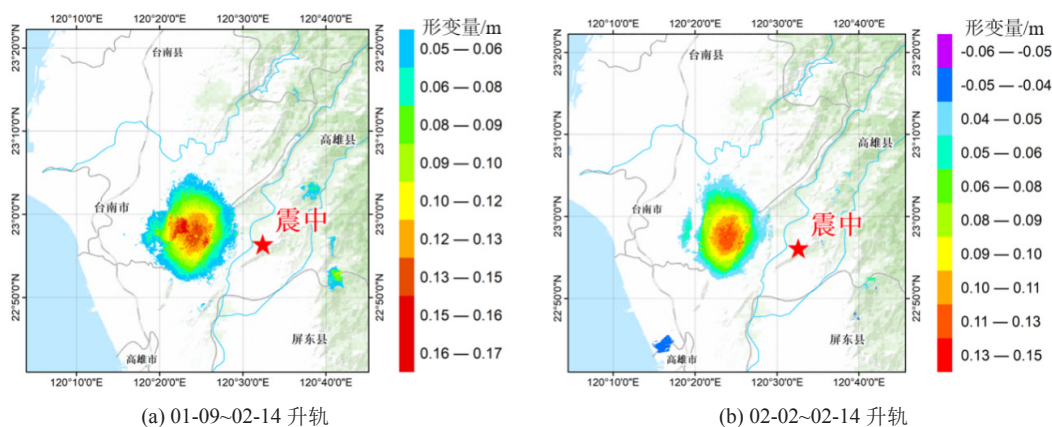
### (4) 相位解缠

相位解缠是解决相位模糊问题，即在差分干涉图相位差主值的基础上确定整周期的个数，以获得地表形变的真实相位。目前主要的解缠方法有：最小费用流法、区域增长法等。当存在大范围的低相干或是有其他限制增长的原因而致使解缠困难时，最小费用流法可以取得较好的结果，因此本实验采用自适应最小费用流法

进行相位解缠。

### (5) 轨道精炼和重去平、相高转换

轨道精炼及重去平即轨道精炼和相位偏移的计算，轨道精炼方法采用健壮性好、在基线微小情况也可以使用多项式优化的方法，以此解决多项式的卫星轨道相位偏移的纠正问题，之后将相位值转化为形变值，得到升轨数据和降轨数据在雷达视线向的形变分布图 6。



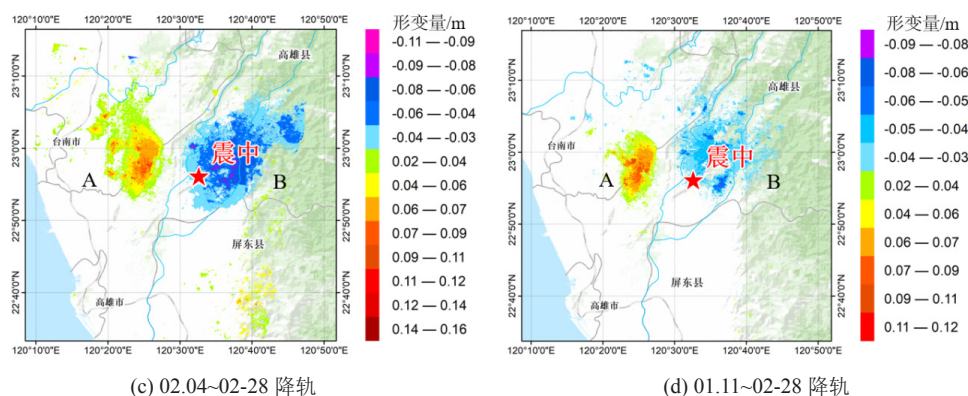


图6 研究区域地表形变分布

Fig.6 Distribution of surface deformation in the study area

## 2.2 台湾地震地表形变分析

(1) 从图6(a)和(b)可以看出,两个升轨干涉对的D-InSAR在震中的左侧都监测出了地表抬升,其抬升中心一致,在 $22^{\circ}56'00''\text{N}$ ,  $120^{\circ}24'00''\text{E}$ 附近,但由于两个干涉对的时间和空间基线的差异,二者监测到的最大抬升量和地表抬升的范围并不相同,第一个干涉对监测到的最大抬升量为16.5 cm,抬升范围为5~16.5 cm,第二个干涉对监测到的最大抬升量为14 cm,抬升范围为4~14 cm。

(2) 从图6(c)和(d)可以看出,两个降轨干涉对的D-InSAR在震中的左、右两侧分别监测出了地表抬升和下沉,抬升中心在 $22^{\circ}57'00''\text{N}$ ,  $120^{\circ}25'00''\text{E}$ 附近,下沉中心在 $22^{\circ}57'00''\text{N}$ ,  $120^{\circ}37'00''\text{E}$ 附近,同样,由于两个干涉对的时间和空间基线不同,二者监测到的最大抬升、最大下沉量、抬升或下沉的程度和范围等也不太相同。

(3) 在地震发生后,地表出现了不同程度的变形,升降轨数据处理得到的结果也存在一定的差异。升轨数据监测的地表形变主要表现为地表的抬升。降轨数据监测的地表形变表现

为震中一侧抬升,一侧下沉,抬升区地理位置和抬升量与升轨数据较为一致,下沉量最大达到-11 cm。

(4) Sentinel-1A卫星是右侧视几何成像模式(图7),这种模式会导致升降轨数据获取的同一地表影像存在一定的差异。台湾中部为东北-西南走向的中央山脉,平均海拔3000 m,西部地区较为平坦,主要为平原、丘陵地区,最大的嘉南平原平均海拔低于100 m,地形起伏较小。卫星升轨时右侧视成像,距离向上依次为平原地区、高山地区,平原地区起伏小,卫星成像时能够获取视线向地表抬升形变,而沉陷区在抬升区东侧,抬升区对其有一定遮挡,卫星未能探测到,因此,在升轨数据获取的形变分布图上,只有明显的抬升形变。卫星降轨成像时,距离向上依次为高山地区、平原地区,海拔较高的中央山脉对侧视成像有一定遮挡,在山脉西侧存在雷达阴影,成像质量较差,因此在降轨数据中,地表形变不明显。沉陷区在抬升区东侧,卫星能够探测到,形成两相邻的形变区(图8)。

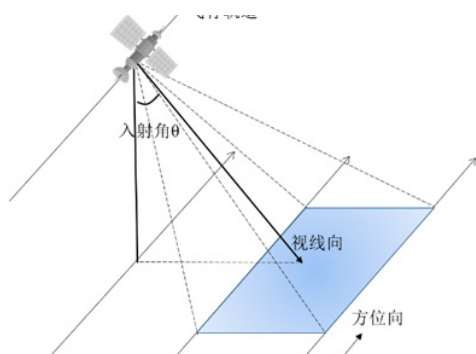


图7 右侧视几何成像模式

Fig.7 Geometric imaging mode of right view

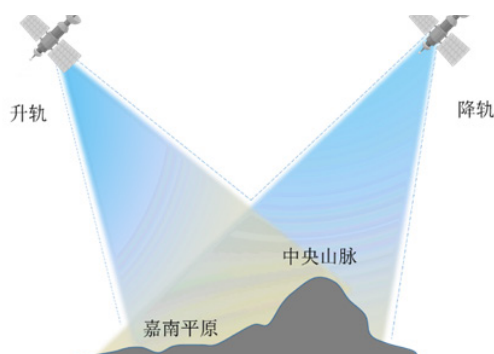


图8 升降轨飞行示意图

Fig.8 Schematic diagram of flying on ascending and descending orbit

### 3 结论

论文使用台湾地震前后的 6 景 SAR 影像数据, 分别构成 2 个升轨干涉对和 2 个降轨干涉对, 系统研究了升降轨 D-InSAR 技术在台湾地震地表形变监测中的应用, 得到如下主要结论:

(1) 升轨数据与降轨数据获得的均为各自雷达视线向 LOS (Line of Sight) 的地表形变量, 而升降轨数据由于 Sentinel-1A 卫星飞行轨道和飞行方向存在的差异, 以及右侧视成像模式的影响, 导致获得的地表形变分布呈现出一定的差异性。在本实验中, 从升轨数据中可以获得较为明显的地表抬升形变分布, 但未能显示地表下沉信息, 从降轨数据中可以得到两个相邻的抬升和下沉形变区, 能反映出地表的抬升和沉降量, 但是分布不明显。即实验表明升轨数据由于抬升区遮挡, 未能显示地表沉陷, 但成像质量较好; 降轨数据受中央山脉造成的雷达阴影影响较大, 成像质量较差, 但能够反映出较为完整的形变分布; 因此, 联合升降轨数据可以较为全面地获得地震前后地表的形变分布情况。

(2) 推断 2016 年台湾省美浓地震主要由逆冲断层发生错动俯冲造成, 形成了两个相邻的抬升区和下沉区, 主要表现为地表的隆起。此次地震形变区最大的区域不在震中 ( $22.94^\circ\text{N}$ ,  $120.54^\circ\text{E}$ ) 附近, 而在震中西北向、距离约 20 km 的台南县, 有大范围的地表抬升形变。

(3) D-InSAR 技术可以通过两景地震前后 SAR 影像进行差分干涉处理, 获取因地震造成的地表的厘米级甚至毫米级形变分布, 是一种在大范围内快速获取较高精度的地表形变的对地观测技术, 但在相同的成像模式、相同轨道

情况下, 由于时间基线、空间基线以及研究区地形地貌影响, 都会对 D-InSAR 地表形变监测结果产生影响, 因此, 在利用 D-InSAR 进行地表形变监测时, 应结合研究区实际情况, 尽可能选取多种时间基线、空间基线 SAR 影像数据, 才能全方位监测研究区地表形变的实际情况。

### 参考文献

- [1] 邵叶. 基于 D-InSAR 和 Offset\_Tracking 技术的同震形变场提取研究 [D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2011.
- [2] 王腾, 廖明生. Sentinel-1 卫星数据提取同震形变场: 最新技术及震例 [J]. 遥感学报, 2018 (S1): 120-127.
- [3] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1989, 94 (B7): 9183-9191.
- [4] Massonnet, D., P. Briole, and A. Arnaud. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry [J]. Nature, 1995, 375: 567-570.
- [5] 董景龙, 沈强, 汪汉胜, 等. 台湾美浓  $M_w6.4$  地震 InSAR 形变场初步分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37 (09): 893-897.
- [6] 杨亚夫, 朱建军, 王永哲, 等. 利用 Sentinel-1A 数据、D-InSAR 和沿轨干涉技术获取 2016 年高雄  $M_s6.7$  地震三维形变场 [J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37 (04): 339-343.
- [7] 李少青, 杨武年, 杨彦通, 等. Sentinel-1A\_IW 雷达影像在地震形变信息提取中的应用 [J]. 测绘, 2016, 39 (02): 56-59.
- [8] 李兆焱, 袁晓铭. 2016 年台湾高雄地震场地效应及砂土液化破坏概述 [J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36 (03): 1-7.
- [9] 胡进军. 2016-02-06 台湾高雄地震事件 [J]. 自然灾害学报, 2016, 25 (01): 191-192.
- [10] 廖明生, 林琿. 雷达干涉测量 - 原理与信号处理基础 [M]. 北京: 测绘出版社, 2003.
- [11] 陶秋香, 刘国林, 孙翠羽, 等. InSAR 成像原理、工作模式及其发展趋势 [J]. 矿山测量, 2008 (01): 38-41+4.